Physik

Ingo Blechschmidt

7. Juli 2005

Inhaltsverzeichnis

1 Physik

1.1 Schulheft

1.1.1 Teilgebiete der Mechanik

Kinematik
Bewegungslehre

Dynamik
Einfluss von Kräften auf Bewegungen

Statik
Gleichgewicht von Kräften und Drehmomenten

Bewegung
Ortsveränderung bezüglich eines Bezugssystems

Bezugssystem
Koordinaten-System, in dem der Bewegungsablauf betrachtet wird

1.1.2 Geradlinige Bewegungen

Die gleichförmige Bewegung

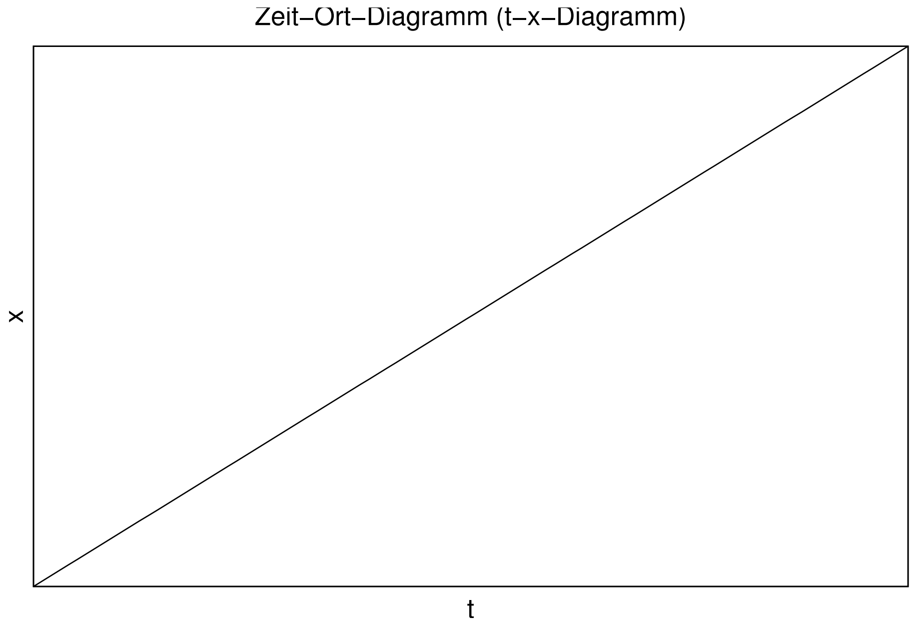
Kennzeichen: In gleichen Zeitabschnitten Δt werden gleiche Wege Δx zurückgelegt.

$$\text{Weg} = x \sim t = \text{Zeit} \Longrightarrow \frac{x}{t} = \text{const.} =: v;$$

Die Geschwindigkeit einer gleichförmigen Bewegung ist der konstante Quotient $\frac{x}{t}$.

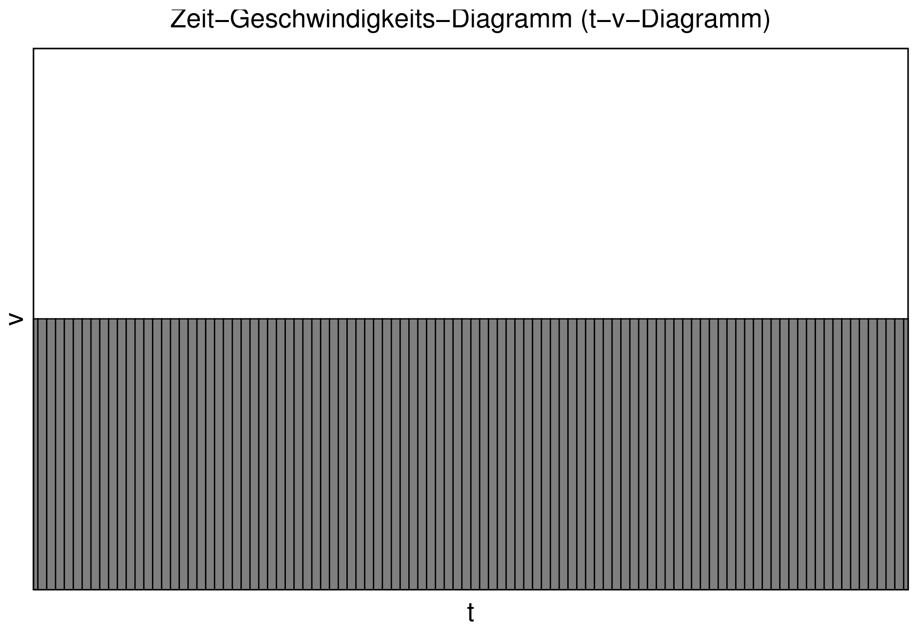
$$v = \frac{x}{t} \text{ und } v = \frac{\Delta x}{\Delta t};$$

Graphische Darstellung: $v = \frac{x}{t}; \Longrightarrow x = v \cdot t$



$v = \frac{\Delta x}{\Delta y}$;

Die Steigung der Ursprungsgeraden ist ein Maß für die Geschwindigkeit.

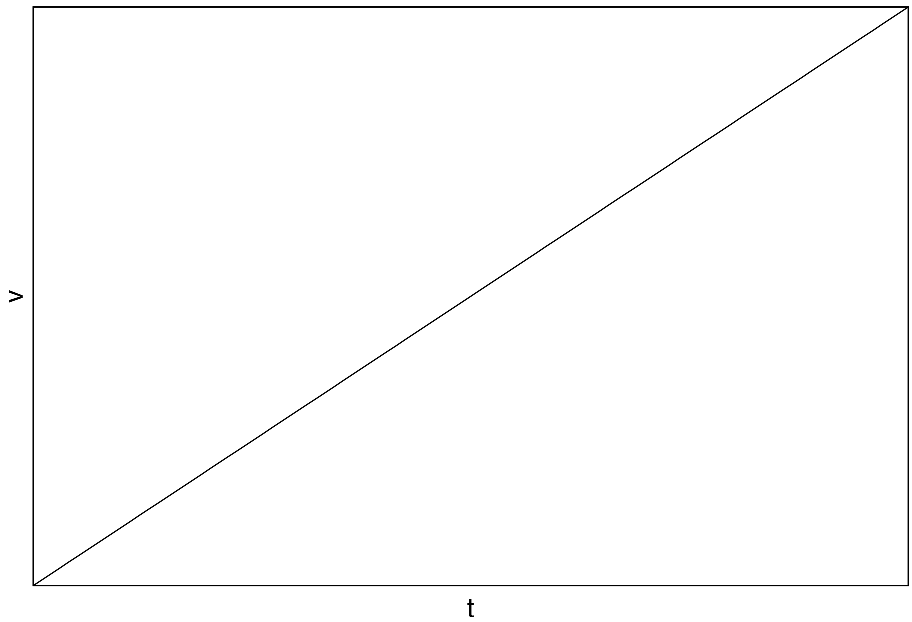


Die Fläche unter dem t-v-Diagramm ist ein Maß für den zurückgelegten Weg x.

Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Kennzeichen: Die Geschwindigkeit ändert sich proportional zur Zeit.

$$v \sim t;$$



Die Geschwindkeit nimmt bei festen Zeitintervallen Δt stets um den selben Betrag zu. $\Rightarrow \Delta v \sim \Delta t;$

Es gilt: $\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v}{t} = \text{const.};$

Der konstante Quotient $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ wird als Beschleunigung a der gleichmäßig beschleunigten Bewegung bezeichnet.

Einheit der Beschleunigung: $1\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$

Umrechnung:

- $1\frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}} = \frac{1}{3{,}6}\frac{\text{m}}{\text{s}};$
- $1\frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6\frac{\text{km}}{\text{h}};$

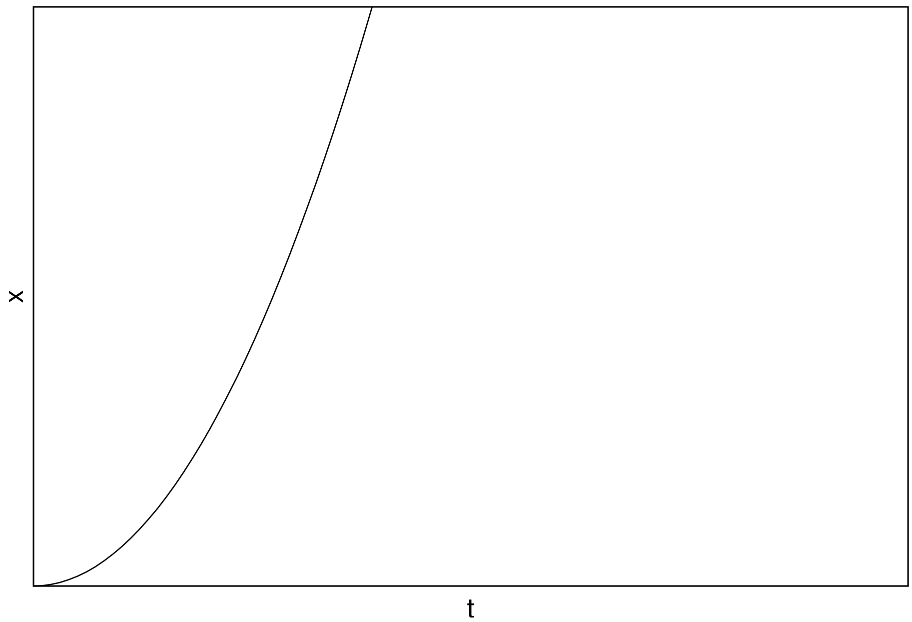
$$\frac{v}{t} = a = \text{const.};$$

$\Rightarrow$ Bewegungsgleichung: $v\left(t\right) = a{\cdot}t;$ (Geschwindigkeit-Zeit-Funktion)

$s = \overline{v} \cdot t = \frac{v}{2}t = \frac{at}{2}t = \frac{at^2}{2};$

$\Rightarrow x(t) = \frac{1}{2}a \cdot t^2;$

Weitere Herleitung: Die Fläche $\triangle Otv$ ist ein Maß für die Strecke. $\Rightarrow$ $x(t) = \frac{1}{2}tv = \frac{1}{2}at^2$; (Dreiecksfläche).



Der Graph ist eine Parabel!

Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	Gleichförmige Bewegung
$a(t) = \text{const.};$ $v(t) = at;$ $x(t) = \frac{1}{2}at^2;$	$a(t) = 0;$ $v(t) = \text{const.};$ $x(t) = vt;$

Zusätzlich: $\left.\begin{array}{l} v^2 = a^2t^2; \Longrightarrow t^2 = \frac{v^2}{a^2}; \\ x = \frac{1}{2}at^2; \end{array}\right\} \Longrightarrow v^2 = 2ax;$

Trägheitssatz von NEWTON:

> Ein Körper behält seinen Bewegungszustand bei, wenn auf ihn keine Kräfte wirken, d.h., er bleibt in Ruhe oder bewegt sich geradlinig gleichförmig weiter.

Messung:

- $t_1 = 1,4731\text{s};\ \Delta t_1 = 0,0119\text{s};\ x_1 = 0,303\text{m};$
- $t_2 = 2,0863\text{s};\ \Delta t_2 = 0,0083\text{s};\ x_2 = 0,607\text{m};$
- $t_3 = 2,5552\text{s};\ \Delta t_2 = 0,0067\text{s};\ x_3 = 0,906\text{m};$

1. Auswertung nach $a = \frac{v}{t}$:

- $a_1 = \frac{v_1}{t_1} = 0,28\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$
- $a_2 = \frac{v_2}{t_2} = 0,29\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$
- $a_3 = \frac{v_3}{t_3} = 0,29\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$

2. Auswertung nach $a = \frac{2x}{t^2}$:

- $a_1 = \frac{2x_1}{t_1^2} = 0,279\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$
- $a_2 = \frac{2x_2}{t_2^2} = 0,279\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$
- $a_3 = \frac{2x_3}{t_3^2} = 0,278\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$

Geradlinige Bewegungen mit Anfangsgeschwindigkeit

Bewegungsleichungen:

- $v(t) = v_0 + a \cdot t;$
- $x(t) = v_0 \cdot t + \frac{1}{2}at^2;$
- $v(t)^2 - v_0^2 = 2ax;$

Zum Bremsweg

$v^2 - v_0^2 = 2ax_{Br}; \Longrightarrow x_{Br} = -\frac{v_0^2}{2a}; a = -\frac{v_0^2}{2x};$

Faustregeln aus der Fahrschule

Z: Zahl, die am Tacho abgelesen wird. D.h.: $v_0 = Z\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}};$

Reaktionsweg: Faustregel: $x_R = \frac{Z}{10} \cdot 3\mathrm{m} = 0,3 \cdot Z\mathrm{m};$

„Schrecksekunde“ $t_R = 1\mathrm{s}; \Rightarrow x_R = v \cdot t_R = 0,28 \cdot Z\mathrm{m};$

Bremsweg: $x_{Br} = \left(\frac{Z}{10}\right)^2 \mathrm{m};$

exakt: $x_{Br} = -\frac{v_0^2}{2a};$

Wie groß ist a in der Faustregel? $a = -\frac{v_0^2}{2x_{Br}} \approx -4\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2};$

1.1.3 Die Grundgleichung der Mechanik

Wovon hängt die erzielte Beschleunigung ab?

Untersuchung, Teil 1

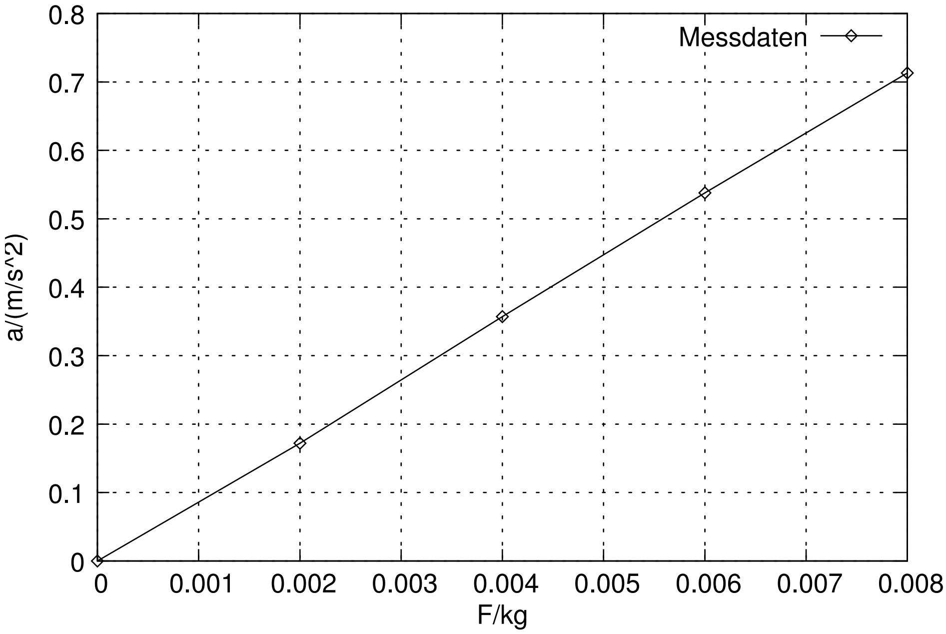
Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung bei konstanter Masse

Wir messen den Weg x vom Start zur Lichtschranke und die benötigte Zeit t. a ergibt sich aus $x = \frac{1}{2}at^2; \Longrightarrow a = \frac{2x}{t^2};$

Messung: $x = 75,0cm;$

$\frac{t}{\mathrm{s}}$	$\frac{F}{g \cdot \mathrm{kg}}$	$\frac{a}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}$	$\frac{\frac{F}{a}}{\frac{Ns^2}{m}}$
2,95	0,002	0,172	0,114
2,05	0,004	0,357	0,109
1,67	0,006	0,538	0,109
1,45	0,008	0,713	0,110

Diagramm:



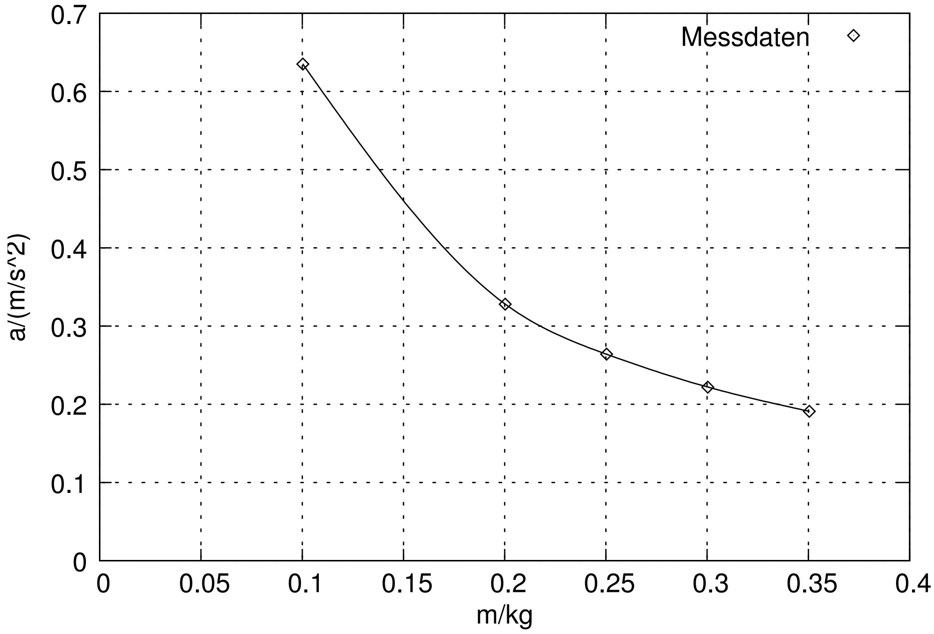
$\Rightarrow$ Ergebnis: $a \sim F$;

Untersuchung, Teil 2

Zusammenhang zwischen Mssage und Beschleunigung bei konstanter Zugkraft

Messung:

$\frac{m}{\mathrm{kg}}$	$\frac{a}{\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}$	$\frac{m \cdot a}{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}$	$\frac{k}{\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}}}$
0,1003	0,635	0,0637	1,07
0,2003	0,328	0,0657	1,05
0,2503	0,264	0,0661	1,04
0,3003	0,222	0,0667	1,03
0,3503	0,191	0,0664	1,03



$\Rightarrow a \sim \frac{1}{m};$

Zusammenfassung

$$\left.\begin{array}{l} a \sim F; \\ a \sim \frac{1}{m}; \end{array}\right\} \Longrightarrow a \sim \frac{F}{m}; \Longrightarrow$$

$F \sim am; \Longrightarrow$

$F = k\dot{m}a; \Longrightarrow$

$k = \frac{F}{m \cdot a};>$

Im Experiment: $F = 0{,}00700\mathrm{kg} \cdot 9{,}81\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} = 0,687\mathrm{N};$

Das Experiment liefert: $k \approx 1{,}05\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{kg}\cdot\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}};$

Die Krafteinheit $1\mathrm{N}$ wurde so festgelegt, dass $k = 1$ ist.

$\Rightarrow$ Grundgleichung der Mechanik:

$$F = m \cdot a;$$

Ein Newton ist die Kraft, die einen Körper der Masse $1\mathrm{kg}$ die Beschleunigung $1\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$ erteilt.

Einheit der Kraft: $1\mathrm{N} = 1\mathrm{kg}\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2};$

Bemerkung:

- $a > 0$; $\Rightarrow F$ ist in Bewegungsrichtung;
- $a < 0$; $\Rightarrow F$ wirkt gegen die Bewegungsrichtung;

1.1.4 ATWOODsche Fallmaschine

a) Beschleunigung der Masse ($m = 100\text{g}$, $m_2 = 2{,}0\text{g}$) durch die Gewichtskraft von m_2:

$F_G = m_2 g = 0{,}020\text{N}$;

$a = \frac{F_G}{2m_1+m_2} = 0{,}10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$;

b) Geschwindigkeit nach $t = 2{,}0\text{s}$:

$v = a \cdot t = 0{,}10\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2{,}0\text{s} = 0{,}20\frac{\text{m}}{\text{s}}$;

Weg nach $t = 2{,}0\text{s}$:

$x = \frac{1}{2}at^2 = 0{,}20\text{m}$;

c) Seilkraft im Punkt A:

Gleichgewicht: $F_s = 1 \cdot mg$;

Nicht im Gleichgewicht: $F_s = F_{G_m} + F_{beschl_m}$;
$F_{G_m} = m \cdot g$;
$F_{beschl_m} = m \cdot a$;
$a = 0, 10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$;

Im Versuch: $m = 50\text{g}$; $F_G = 0{,}49\text{N}$; $a = \frac{100\text{g} \cdot g}{150\text{g}} = \frac{mg}{3 \cdot m} = \frac{g}{3}$;

1.1.5 Freier Fall

Freier Fall: Bewegung eines Körpers nur unter dem Einfluss der Gewichtskraft F_G.

Einheit der Fallbeschleunigung (aka Ortsfaktor): $1\frac{\text{N}}{\text{kg}} = \frac{1\text{kg}\frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{kg}} = 1\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$;

Bewegungsgleichungen für den freien Fall:

- $v(t) = -gt$;
- $y(t) = -\frac{1}{2}gt^2$;

- $v^2(y) = -2gy;$

$\Rightarrow$ Unabhängigkeit der Gleichungen von m; $\Rightarrow$ Bewegung für alle Körper gleich;

Versuch:

a) Feder und Bleistück in luftgefüllter Röhre: Feder fällt aufgrund des Luftwiderstands langsamer.

b) In der evakuierten Röhre fallen Feder und Bleistück gleich schnell.

$\Rightarrow$ Die Fallbeschleunigung ist am gleichen Ort für alle Körper gleich.

Bestimmung der Fallbeschleunigung

Messung: Fallhöhe $h = 1{,}20\mathrm{m}$, Fallzeit $t = 480\mathrm{ms}$

$g = -\frac{2x}{t^2} = 10{,}4\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2};$

Präzisionsmessung:

Augsburg
$g = 9{,}81\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2};$

Äquator
$g = 9{,}78\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2};$

Pol
$g = 9{,}83\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2};$

Senkrechter Wurf

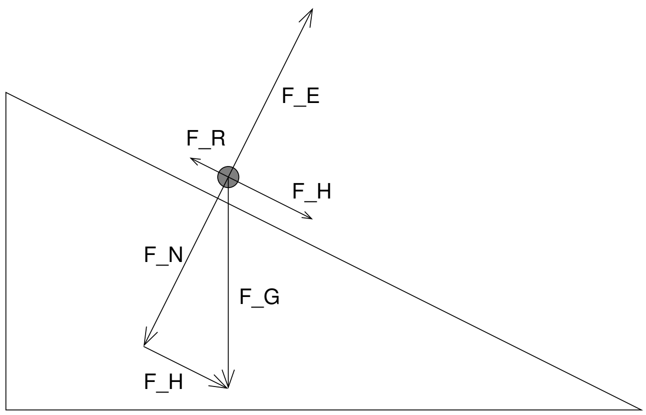
Freier Fall mit Anfangsgeschwindigkeit.

Bewegungsgleichungen:

- $v(t) = -gt + v_0;$
- $y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t;$
- $v^2(t) - v_0^2 = -2gy(t);$

Wurf nach unten (oben): $v_0 < 0$; ($v_0 > 0$;)

1.1.6 Bewegungen auf der Schiefen Ebene



Gesamtkraft: $\overrightarrow{F} = \overrightarrow{F_H} + \overrightarrow{F_R}$;

$\sin\alpha = \frac{F_H}{F_G} = \frac{F_H}{mg}; \Rightarrow F_H = mg \cdot \sin\alpha;$

$\cos\alpha = \frac{F_N}{F_G} = \frac{F_N}{mg}; \Rightarrow F_N = mg \cdot \cos\alpha;$

$F_R = \mu \cdot F_N = \mu mg \cdot \cos\alpha;$

$F = F_H - F_R = mg\left(\sin\alpha - \mu\cos\alpha\right);$

$a = \frac{F}{m} = g \cdot \left(\sin\alpha - \mu\cos\alpha\right);$

1.1.7 Mechanische Arbeit

$[W] = [F \cdot s] = \mathrm{J}; \overrightarrow{F} = \text{const.}; \overrightarrow{F} \| \overrightarrow{s};$

Die Kraft F verrichtet die Arbeit W.

Im Allgemeinen sind Kraft und Weg nicht parallel.

Insgesamt: $W = Fs\cos\alpha$; mit $F = \left|\overrightarrow{F}\right|; s = |\overrightarrow{s}|; \alpha = \angle(\overrightarrow{F}, \overrightarrow{s});$

Arbeit wird von außen verrichtet. $\Rightarrow$ Arbeit W ist die Änderung ΔE der Energie eines Körpers.

$W < 0; \Rightarrow \Delta E < 0; \Leftrightarrow$ Energie des Körpers nimmt ab.

$W > 0; \Rightarrow \Delta E > 0; \Leftrightarrow$ Energie des Körpers nimmt zu.

Kinetische Energie

Ein Körper der Masse m wird aus der Ruhe durch eine Kraft $\overrightarrow{F}$ längs der Strecke Δx auf die Geschwindigkeit v beschleunigt, Beschleunigungsarbeit muss geleistet werden.

$W_B = F\Delta x = ma\Delta x = \frac{1}{2}mv^2;$

$\Rightarrow E_{kin}(v) = \frac{1}{2}mv^2;$

Anfangsgeschwindigkeit v_0: $W_B = \frac{1}{2}m\left(v^2 - v_0^2\right);$

$v_0 > v; \Rightarrow W_B < 0;$ (Der Körper verliert kinetische Energie (Bremsung).)

Beispiel: Breimskraft F, $W_R = -Fs$, kinet. Energie: $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$, $E_{kin} + W_R = 0 \Rightarrow \frac{1}{2}mv^2 - Fs = 0; \Rightarrow s = \frac{mv^2}{2F};$

Potentielle Energie

Höhenenergie

Wird ein Körper der Masse m von der Höhe $y = 0$ auf die Höhe $y = h$ gehoben, so wird die Hubarbeit $W_H = mgh$ verrichtet.

$W_H = \Delta E_{pot}; E_{pot}(h = 0) = 0; E_{pot} = mgh;$

Die Hubarbeit W_H hängt **nicht** vom durchlaufenen Weg ab!

Negative Hubarbeit: Beispiel: Herablassen einer Last: $\overrightarrow{F}$ ist antiparallel zu $\overrightarrow{s}$; $\Rightarrow \alpha = 180°; \cos\alpha = -1;$ $\Rightarrow$ Potentielle Energie wird kleiner.

Negative potentielle Energie: Körper befindet sich unterhalb des Nullniveaus.

Federenergie

Eine Feder (der Federhärte D) wird in die Strecke s gedehnt.

$W = Fs\cos\alpha;$ $\overrightarrow{F}$ ist nicht konstant: $F = Ds;$

$W_F = \frac{1}{2}Fs = \frac{1}{2}Ds^2;$

$W_F = \Delta E_F; E_F(s = 0) = 0; E_F = \frac{1}{2}Ds^2;$

Dehnung einer vorgespannten Feder:
$W_F = \frac{1}{2}D\left(s^2 - s_0^2\right);$

Energieerhaltungssatz: In einem reibungsfreien, abgeschlossenen System ist die Summe aus potentieller und kinetischer Energie konstant. (Anm. von mir: Falsch, die Summe ist **immer** konstant).

1.1.8 Das 3. NEWTONsche Gesetz (Wechselwirkungsgesetz)

Kraft und Gegenkraft sind entgegengesetzt gerichtet.

3. NEWTONsche Gesetz: Kraft $\vec{F_A}$ und Gegenkraft $\vec{F_B}$ verhalten sich wie $\vec{F_A} = -\vec{F_B}$;

In Worten: „Actio gegengleich reactio“

$\vec{F_A}$ und $\vec{F_B}$ heißen Wechselwirkungskräfte.

1.1.9 Der Impuls

Kugelexperiment:

Verbunden: $E_{\text{ges}} = E_F = \frac{1}{2}Ds^2$;

Gelöst: $E_{\text{ges}} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2$;

$\frac{1}{2}Ds^2 = \frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2$;

$\Rightarrow$ Eine Gleichung für zwei Unbekannte.

$\Rightarrow$ Energieerhaltung genügt nicht zur Beschreibung der Bewegung.

Betrachte die Kräfte:

3. NEWTONsche Gesetz: $\vec{F_1} = -\vec{F_2}$;

$\Rightarrow m_1a_1 = -m_2a_2; \Rightarrow m_1\frac{\Delta v_1}{\Delta t_1} = -m_2\frac{\Delta v_2}{\Delta t_2}; \Rightarrow m_1\Delta v_1 = -m_2\Delta v_2; \Rightarrow m_1v_1 = -m_2v_2$;

Beide Gleichungen beschreiben die Bewegung vollständig.

Definition: Unter dem Impuls p verstehen wir das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit $[p] = [m \cdot v] = 1\frac{\text{kgm}}{\text{s}} = 1\text{Ns}$;

$m_1v_1' + m_2v_2' = 0 = p_{\text{ges}}$;

Vor dem Lösen der Verbindung: $v_1 = v_2 = 0; \Rightarrow p_1 = p_2 = 0; \Rightarrow p_{\text{ges}} = p_1 + p_2 = 0$;

1.1.10 Der Impulserhaltungssatz

Ist der Gesamtimpuls eine Erhaltungsgröße?

Betrachte Stoß zwischen Wagen (m_1 und m_2) mit den Anfangsgeschwindigkeiten v_1 und v_2:

$p_{\text{ges}} = p_1 + p_2 = m_1v_1 + m_2v_2$;

Nach dem Stoß:

- $v_1' = v_1 + \Delta v_1;$
- $v_2' = v_2 + \Delta v_2;$

$\Delta v_1, \Delta v_2$: Geschwindigkeitsänderungen beim Stoß.

$p'_{\text{ges}} = p_1' + p_2' = m_1 (v_1 + \Delta v_1) + m_2 (v_2 + \Delta v_2);$

$m_1 a_1 = -m_2 a_2; \Rightarrow m_1 \frac{\Delta v_1}{\Delta t} = -m_2 \frac{\Delta v_2}{\Delta t}; \Rightarrow m_1 v_1 = -m_2 v_2;$

$p'_{\text{ges}} = m_1 v_1 + m_2 v_2 + m_1 \Delta v_1 + m_2 \Delta v_2 = m_1 v_1 + m_2 v_2;$

$\Rightarrow p'_{\text{ges}} = p_{\text{ges}};$

Impulserhaltungssatz: In einem reibungsfreien, abgeschlossenen System ist der Gesamtimpuls konstant.

$\overline{F} = \frac{\Delta p}{\Delta t};$

1.1.11 Stoßprozesse

Vollkommen unelastischer Stoß

Wie groß ist v'?

Impulserhaltung:

$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v'; \Rightarrow v' = \dfrac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2};$

Im Experiment ($m_1 = m_2;\ v_2 = 0;$):
$v' = \frac{m_1 v_1}{2 m_1} = \frac{v_1}{2};$

Energieerhaltung (E_v: Verformungsenergie):
$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = E_v + \frac{1}{2} (m_1 + m_2) v'^2;$

Im Experiment ($m_1 = m_2 = 0{,}20\text{kg}; v_2 = 0;$):
$E_v = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} 2 m_1 \left(\frac{1}{2} v_1\right)^2 = \frac{1}{4} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} E_{\text{kin}_1} = 30\text{mJ};$

Spezialfälle:

- m_2 sehr groß $\Rightarrow v' \approx v_2;$
- m_1 sehr groß $\Rightarrow v' \approx v_1;$
- $m_1 = m_2; v_1 = -v_2; \Rightarrow v' = 0;$

Elastischer Stoß

Energieerhaltung:
$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1{v'_1}^2 + \frac{1}{2}m_2{v'_2}^2;$

Bekannt: Geschwindigkeiten vor dem Stoß: v_1, v_2

Impulserhaltung:
$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1v'_1 + m_2v'_2;$

$$v'_1 = \frac{2m_2v_2 + (m_1 - m_2)\,v_1}{m_1 + m_2};$$

$$v'_2 = \frac{2m_1v_1 + (m_2 - m_1)\,v_2}{m_1 + m_2};$$

1.1.12 Würfe

Waagrechter Wurf

Erklärung: Die Bewegung in x-Richtung und in y-Richtung sind voneinander unabhängig.

Waagrechter Wurf:

- $x(t) = v_{0,x}t;$
- $y(t) = -\frac{1}{2}gt^2;$

$y(x) = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_{0,x}}\right)^2 = -\frac{g}{2v_{0,x}^2}\cdot x^2;$ (Bahnkurve)

$\Rightarrow$ Nach unten geöffnete Parabel

Wurfweite: $y_A = -h; \Rightarrow +h = \frac{g}{2v_{0,x}^2}x^2;$

$\Rightarrow x_A = \sqrt{2\frac{hv_{0,x}^2}{g}} = v_{0,x}\sqrt{2\frac{h}{g}};$

Beispiel: Sprung von einem Turm mit Anlauf

Bahngeschwindigkeit: $\vec{v}$ ist tangential zur Bahnkurve.

Auftreffwinkel: $\tan\varphi = \frac{|\vec{v}_y|}{|\vec{v}_x|};$

Schiefer Wurf

$v_{0,x} = v_0 \cdot \cos\alpha;$
$v_{0,y} = v_0 \cdot \sin\alpha;$

$x(t) = v_0 t \cdot \cos\alpha; \Rightarrow t = \frac{x(t)}{v_0 \cdot \cos\alpha};$

$y(t) = -\frac{1}{2} g t^2 + v_0 t \cdot \sin\alpha;$

$\Rightarrow y(x) = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2\alpha} x^2 + x \tan\alpha;$

$y(x_A) = 0; \Rightarrow x_A = \frac{2}{g} v_0^2 \cos^2\alpha \tan\alpha = \frac{2}{g} v_0^2 \sin\alpha \cos\alpha = \frac{v_0^2}{g} \cdot \sin 2\alpha;$

Maximal: $2\alpha = \frac{\pi}{2}; \Rightarrow \alpha = \frac{\pi}{4} = 45°;$

1.1.13 Kreisbewegung

Bogenlänge: $s = \varphi \cdot r;$

Mittlere Geschwindigkeit: $\overline{v} = \frac{\Delta x}{\Delta t};$

Mittlere Winkelgeschwindigkeit: $\overline{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}; \quad [\overline{\omega}] = \frac{1}{\mathrm{s}};$

Konstante Winkelgeschwindigkeit: $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi - \varphi_0}{t - t_0}; \Rightarrow \omega = \frac{\varphi}{t};$

Umlaufdauer T: $\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad [T] = \mathrm{s};$

Frequenz f: $f = \frac{1}{T}; \quad [f] = \frac{1}{\mathrm{s}} = \mathrm{Hz};$

$\Rightarrow \omega = 2\pi f;$

Bewegungsgleichungen:

- $x(t) = r \cdot \cos\omega t;$
- $y(t) = r \cdot \sin\omega t;$

Bahngeschwindigkeit: $v = \frac{\varphi r}{t} = \frac{\omega t r}{t} = \omega r;$

Die Bahngeschwindigkeit ist tangential zum Kreis und steht senkrecht zum Ortsvektor $\vec{v}$.

Für die Ablenkung aus der geradlinigen Bahn ist (vgl. Trägheitssatz!) eine Kraft nötig. Bei einer Kreisbahn ist diese Kraft zum Kreismittelpunkt hin gerichtet und heißt **Zentripetalkraft**.

Gleichförmige Bewegung: $|\vec{v}|$ ändert sich nicht.

Symbol für die Zentripetalkraft: $\vec{F}_r$

Nach Newton: $\vec{F}_r = m \cdot \vec{a}_r;$

Bestimmung der Zentripetalbeschleunigung $\vec{a}_r$:

- Richtung von $\vec{a}_r$: radial nach innen
- Betrag von $\vec{a}_r$: $\frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$: mittlere Beschleunigung im Zeitintervall Δt
  $\Delta t \to 0 \to$ Momentanbeschleunigung
  $\Rightarrow \vec{a}_r = \lim\limits_{\Delta t\to 0} \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$;
  [Abb.]
  $\vec{v}' = \vec{v} + \Delta\vec{v}$;
  Wegen ähnlicher Dreiecke folgt: $\dfrac{\Delta v}{v} = \dfrac{\overline{PP'}}{r}; \Rightarrow \Delta v = v \cdot \dfrac{\overline{PP'}}{r}; \Rightarrow$
  $\dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \dfrac{v}{\Delta t}\dfrac{\overline{PP'}}{r}$;
  Mit $\Delta t \to 0$ nähert sich $\overline{PP'}$ der Bogenlänge $\Delta s = v \cdot \Delta t$ an.
  $\Rightarrow \lim\limits_{\Delta t\to 0} \dfrac{\Delta v}{\Delta t} = \lim\limits_{\Delta t\to 0} \dfrac{v}{\Delta t}\dfrac{\overline{PP'}}{r}$ „=“ $\lim\limits_{\Delta t\to 0} \dfrac{v}{r}\dfrac{v\cdot\Delta t}{\Delta t} = \frac{v^2}{r} = |\vec{a}_r|$;
  Ergebnis: Für den Betrag der Zentripetalbeschleunigung bei der gleichförmigen Kreisbewegung gilt: $|\vec{a}_r| = a_r = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r$;
  Es gilt: $a_r \sim r$;

Folgerung: Für die Zentripetalkraft F_r gilt daher (nach NEWTONs 2. Gesetz): $F_r = m \cdot a_r = m\frac{v^2}{r} = m\omega^2 r$ mit $\omega = \frac{2\pi}{T}$;

[Versuch: Überprüfung unserer deduktiven Herleitung]

Beispiel: Schiffschaukel (vgl. Buch S. 89)

[Abbildung: Kreis, oben A, links B, unten C]

a) In A soll v_A so groß sein, dass ein Gegenstand in der Schaukel nicht herunterfällt (Schwerelosigkeit), d.h. in A wird die Gewichtskraft komplett für die Zentripetalkraft verwendet:

$F_{R_A} = F_G; \Rightarrow m\frac{v_A^2}{r} = mg; \Rightarrow v_A = \sqrt{rg}$;

b) Betrag der Geschwindigkeit auf dem Weg von A nach C:

Energieerhaltung $\Rightarrow |\vec{v}|$ nimmt zu.

In C: Nullniveau für E_{pot}

Energiebilanz in der Höhe h: $2mgr + \frac{1}{2}mv_A^2 = mgh + \frac{1}{2}mv_h^2; \Rightarrow v_h = \sqrt{5gr - 2gh}$;

Geschwindigkeit in B: $v_B = \sqrt{5gr - 2gr} = \sqrt{3gr}; \Rightarrow F_{R_B} = 3mg$;

Geschwindigkeit in C: $v_C = \sqrt{5gr - 0} = \sqrt{5gr}; \Rightarrow F_{R_C} = 5mg$;

Kurvenfahrt

F: Kraft der Straße auf das Auto (Gegenkraft der Normalkraft)

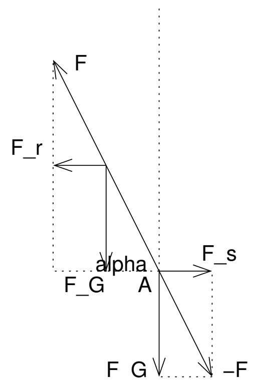
Bei idealer Kuvenüberhöhung liefert $\vec{F} + \vec{G}$ eine Kraft zum Mittelpunkt der Kreisbahn:
$\vec{F}_r = \vec{F} + \vec{G}$;

Bei idealer Kurvenüberhöhung gilt:

$\tan\alpha = \frac{F_r}{G} = \frac{m\frac{v^2}{r}}{mg} = \frac{v^2}{rg}$; (unabhängig von m)

$\Rightarrow v = \sqrt{rg \cdot \tan\alpha}$ ist die optimale Geschwindigkeit für die Kurve.

Radler in der Kurve (ohne Überhöhung)



- Neigung nach innen um α
- $\vec{F}_r$: Zentripetalkraft
- $\vec{F}_s$: Seitliche Kraft
- A: Auflagepunkt

$\vec{F}$ ist die Reactio auf die Kraft des Rades im Auflagepunkt A. Ihre **Vertikalkomponente** hält F_G das Gleichgewicht.

Die **Horizontalkomponente** von $\vec{F}$ ist $\vec{F}_r$. Sie hat keine ersichtliche Gegenkraft[1] und dient als Zentripetalkraft.

[1]Die Gegenkraft ist die Trägheit der Masse.

Für den Neigungswinkel α gilt:
$\tan\alpha = \frac{F_r}{F_g} = \frac{v^2}{rg}$;

In A: F_s muss von der Haftung zwischen Reifen und Fahrbahn aufgebracht werden. Haftkraft $F_H \geq F_s = F_r$;

Wegen $F_H = \mu \cdot F_s$ folgt für die Haftreibungszahl:
$\mu \cdot F_G \geq F_r; \Rightarrow \mu \geq \frac{F_r}{F_G} = \tan\alpha$;

Also sichere Kurvenfahrt, solange $\mu > \tan\alpha$;

Zwei Probleme

- Wie beeinflusst die Erdrotation die Gewichtskraft der Körper auf der Erdoberfläche (am Äquator, in Augsburg (48° n.Br.)) prozentual?

  $$F_r(\alpha) = m\frac{v^2}{r} = m\frac{v^2}{r\cos\alpha};$$
  $$F_e(\alpha) = mg - F_R(\alpha) = m\left[g - \frac{v^2}{r\cos\alpha}\right];$$
  $$\frac{F_e(\alpha)}{mg} = 1 - \frac{v^2}{rg\cos\alpha} = 1 - \frac{4\pi^2r^2}{rgT\cos\alpha} = 1 - \frac{4\pi^2 r}{Tg\cos\alpha};$$
  $\Rightarrow$ Bei 0°: ca. 0,00343%
  $\Rightarrow$ Bei 48°: ca. 0,00513%

- Jeder Massenpunkt der Erdkugel, der nicht auf der Erdachse liegt, erfährt eine Zentrifugalkraft $F_{fl} = m\omega^2 R_E \cos\varphi$. Sie ist senkrecht zur Erdachse gerichtet. F_{fl} kann in zwei Komponenten zerlegt werden:

  – Die senkrecht zur Erdoberfläche gerichtete **Radialkomponente** F_{rad} – Sie bewirkt. . .
  – Eine tangential zur Erdoberfläche (längs der Meridiane) verlaufende, zum Äquator gerichtete **Tangentialkomponente** F_{tang}. Sie hat die Abplattung der Erde mit dem Wülsten am Äquator verursacht. (Die feste Erdkruste „schwimmt“ auf einem flüssigen Kern!)

1.1.14 Beschreibung des Sonnensystems

Ptolemäus (ca. 90-160 n.Chr.): „Almagest“

Geozentrisches Weltbild

Kopernikus (1473-1543)

1. Sonne steht im Mittelpunkt, ruht.
2. Fixsterne sind auf einer kugelförmigen, unermesslich großen, Sphäre angebracht, unbeweglich.
3. Planeten und Erde auf Kreisbahnen um die Sonne

[Galilei 1564-1642]

Johannes Kepler (1571-1630)

(Die ersten zwei Gesetze schon 1609, das dritte Gesetz erst 1619.)

1. Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Der von der Sonne zum Planeten gezogene Fahrstrahl überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen (Flächensatz).
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten T zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Halbachsen a ihrer Bahnellipsen.
   $\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}; \Rightarrow \frac{T_1^2}{a_1^3} = \frac{T_2^2}{a_2^3} = C_\odot;$

Mittlere Entfernung Erde-Sonne: $1\mathrm{AE} = 1{,}496 \cdot 10^{11}\mathrm{m} \approx 150 \cdot 10^6\mathrm{km};$

Satelliten der Erde

In $1000\mathrm{km}$ **Höhe**

Monddaten: $r_{\mathrm{Mond}} = 60{,}3 R_{\mathrm{Erde}}; \quad T_{\mathrm{Mond}} = 7{,}48 \cdot 10^{-2}\mathrm{a}; \quad r_{\mathrm{Sat}} = 7370\mathrm{km};$

$\frac{T_{\mathrm{Mond}}^2}{T_{\mathrm{Sat}}^2} = \frac{a_{\mathrm{Mond}}^3}{a_{\mathrm{Sat}}^3}; \Rightarrow T_{\mathrm{Sat}} = \sqrt{T_{\mathrm{Mond}}^2 \cdot \frac{a_{\mathrm{Sat}}^3}{a_{\mathrm{Mond}}^3}} = 1{,}74\mathrm{h};$

Geschwindigkeit: $v_{\mathrm{Sat}} = 2\pi \cdot \frac{r_{\mathrm{Sat}}}{T_{\mathrm{Sat}}} = 26613\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} = 266 \cdot 10^2\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}};$

Höhe eines Synchronsatelliten

$T_{\text{Sat}} = T_{\text{Erde}};$

$$\frac{T^2_{\text{Mond}}}{T^2_{\text{Sat}}} = \frac{a^3_{\text{Mond}}}{a^3_{\text{Sat}}}; \Rightarrow a_{\text{Sat}} = \sqrt[3]{a^3_{\text{Mond}} \cdot \frac{T^2_{\text{Sat}}}{T^2_{\text{Mond}}}} = 42344\text{km} = 423 \cdot 10^2\text{km};$$

Umlaufdauer in Erdnähe ($a_{\text{Sat}} \approx R_{\text{Erde}}$)

$$\frac{T^2_{\text{Mond}}}{T^2_{\text{Sat}}} = \frac{a^3_{\text{Mond}}}{a^3_{\text{Sat}}}; \Rightarrow T_{\text{Sat}} = \sqrt{T^2_{\text{Mond}} \cdot \frac{a^3_{\text{Sat}}}{a^3_{\text{Mond}}}} = 84{,}0\text{min};$$

Geschwindigkeit: $v_{\text{Sat}} = 2\pi \cdot \frac{r_{\text{Sat}}}{T_{\text{Sat}}} = 7{,}94\frac{\text{km}}{\text{s}};$ („Erste kosmische Geschwindigkeit“)

Das Gravitationsgesetz von NEWTON

Mondbewegung: Kreisbahn um Erdmittelpunkt, dazu ist eine Zentripetalkraft nötig

Zugehörige Zentripetalbeschleunigung:

$$a_{\text{r}} = \omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2_{\text{Mond}}} r = 2{,}72 \cdot 10^{-3}\frac{\text{m}}{\text{s}^2};$$

Vergleich mit der Fallbeschleunigung auf der Erde:

$$\frac{g}{a_{\text{r}}} = \frac{3600}{1} = \frac{r^2_{\text{Mond}}}{R^2_{\text{Erde}}};$$

D.h., bei 60-facher Entfernung vom Erdmittelpunkt ist die Beschleunigung nur noch der 60^2-te Teil.

$$\Rightarrow a_{\text{r}} \sim \frac{1}{r^2}; \Rightarrow F_{\text{r}} \sim \frac{m}{r^2};$$

Zweiter Teil: Auch für Planetenbahn: Zentripetalkraft nötig

$$F_{\text{r}} = m\omega^2 r = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot mr;$$

Nach KEPLER: $\dfrac{T^2}{r^3} = C_\odot; \Rightarrow T^2 = r^3 \cdot C_\odot;$

$$\Rightarrow F_{\text{r}} = \frac{4\pi^2}{r^3 \cdot C_\odot} \cdot mr = \frac{4\pi^2}{C_\odot}\frac{m}{r^2};$$

Also auch hier: $F_{\text{r}} \sim \frac{m}{r^2};$

Folgerung: Alle Körper ziehen sich gegenseitig an. $\Rightarrow$ Kraft ist proportional zu den **Massen**!

$$F_\mathrm{r} = \frac{4\pi^2}{C_\odot}\frac{m}{r^2} = \frac{4\pi^2}{C_\odot \cdot M_\odot}\frac{m \cdot M_\odot}{r^2};$$

$\Rightarrow F = G \cdot \dfrac{m \cdot M}{r^2}$;[2] (1688, NEWTON)

Bestimmung von G durch CAVENDISH 1798:
$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\,\mathrm{m^3 kg^{-1} s^{-2}}$;

Massenbestimmung

Erdmasse

Gewichtskraft = Gravitationskraft; $\Rightarrow$

$$mg = G \cdot \frac{M_\mathrm{Erde} m}{R_\mathrm{Erde}^2}; \Rightarrow M_\mathrm{Erde} = \frac{R_\mathrm{Erde}^2 g}{G} = 5{,}97 \cdot 10^{24}\mathrm{kg};$$

Erddichte

$$\varrho = \frac{M_\mathrm{Erde}}{V_\mathrm{Erde}} = \frac{M_\mathrm{Erde}}{\frac{4}{3}\pi R_\mathrm{Erde}^3} = 5{,}51\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{dm^3}};$$

Satellitenbahnen (Kreis)

Idee: $F_\mathrm{r} = F_\mathrm{Grav}; \Rightarrow \dfrac{m_\mathrm{Sat} v^2}{r} = G \cdot \dfrac{m_\mathrm{Sat} M_\mathrm{Erde}}{r^2}; \Rightarrow v = \sqrt{G \cdot \dfrac{M_\mathrm{Erde}}{r}};$

Umlaufdauer T:

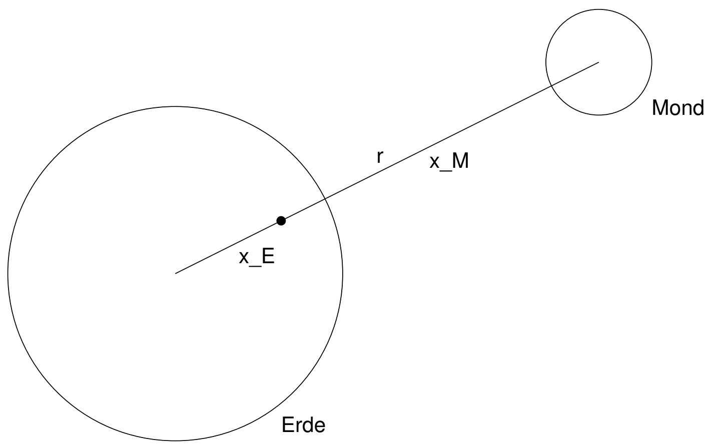
$$v = 2\pi\frac{r}{T}; \Rightarrow T = 2\pi\frac{r}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{G \cdot M_\mathrm{Erde}}};$$

Berechnung der Mondmasse

$F_\mathrm{r} = F_\mathrm{Grav}; \Rightarrow m_\mathrm{Mond}\omega^2 r = G \cdot \dfrac{m_\mathrm{Mond} \cdot m_\mathrm{Erde}}{r^2}$; (ungeeignet!)

Erde und Mond umlaufen einander!

[2] mit $G = \dfrac{4\pi^2}{C_\odot \cdot M_\odot}$, wobei $C_\odot$ den Faktor $\frac{1}{M_\odot}$ enthält.



$x_{\mathrm{Erde}} + x_{\mathrm{Mond}} = r;$

Zentripetalkräfte der beiden Bewegungen sind gleich (Ursache: Gravitation)

$m_{\mathrm{Erde}}\omega^2 x_{\mathrm{Erde}} = m_{\mathrm{Mond}}\omega^2 x_{\mathrm{Mond}}; \Rightarrow m_{\mathrm{Erde}} x_{\mathrm{Erde}} = m_{\mathrm{Mond}} x_{\mathrm{Mond}};$

$\Rightarrow m_{\mathrm{Erde}} x_{\mathrm{Erde}} = m_{\mathrm{Mond}} \left(r - x_{\mathrm{Erde}}\right);$

Möglichst genaue Werte:

- $r = 3{,}844 \cdot 10^8 \mathrm{m};$
- $T = 27{,}322 \cdot 86400 \mathrm{s};$
- $m_{\mathrm{Erde}} = 5{,}976 \cdot 10^{24} \mathrm{kg};$
- $G = 6{,}672 \cdot 10^{-11} \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kgs}^2};$

Gravitationsgesetz:

$F = G \cdot \frac{m_{\mathrm{Erde}} m_{\mathrm{Mond}}}{r^2} = m_{\mathrm{Mond}}\omega^2 x_{\mathrm{Mond}};$

$\Rightarrow x_{\mathrm{Mond}} = \frac{G}{4\pi^2} m_{\mathrm{Erde}} \frac{T^2}{r^2} = 3{,}8088 \cdot 10^8 \mathrm{m};$

$\Rightarrow x_{\mathrm{Erde}} = r - x_{\mathrm{Mond}} = 3{,}52 \cdot 10^6 \mathrm{m};$

$\Rightarrow m_{\mathrm{Mond}} = m_{\mathrm{Erde}} \frac{x_{\mathrm{Erde}}}{x_{\mathrm{Mond}}} = 5{,}52 \cdot 10^{22} \mathrm{kg};$

(Besserer Wert: $m_{\mathrm{Mond}} = 7{,}35 \cdot 10^{22} \mathrm{kg};$)

Das Gravitationsfeld

Radialsymmetrisches Kraftfeld

$ma = F_{\mathrm{G}} = G\frac{mM}{r^2};$

$\Rightarrow a = \frac{F_{\mathrm{G}}}{m} = \frac{GM}{r^2};$

$\Rightarrow g(r) = \frac{G \cdot M}{r^2};$ (Definition der Gravitationsfeldstärke)

Hubarbeit und potentielle Energie im Gravitationsfeld

Auf der Erde: Hubarbeit $W_{\mathrm{H}} = mgh$ bei größerem h ist g nicht konstant.

$\Rightarrow$ Intergralrechnung liefert:

$W_{\mathrm{H}} = G \cdot mM \left(\frac{1}{r_{\mathrm{A}}} - \frac{1}{r_{\mathrm{E}}}\right);$ (Hubarbeit im Gravitationsfeld)

Arbeit für den Transport „ins Unendliche“:

$W_\infty = \lim_{r_{\mathrm{E}} \to \infty} G \cdot mM \left(\frac{1}{r_{\mathrm{A}}} - \frac{1}{r_{\mathrm{E}}}\right) = G \cdot mM \cdot \frac{1}{r_{\mathrm{A}}};$

Beispiel: Geschwindigkeit, um einen Körper von der Erdoberfläche ins Weltall abzuschießen (zweite kosmische Geschwindigkeit).

Ansatz: $E_{\mathrm{kin}} = W_\infty; \Rightarrow v = \sqrt{2GM_{\mathrm{E}}R_{\mathrm{E}}^{-1}} = 11{,}2\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}};$

1.1.15 Mechanische Schwingungen

Grundgrößen

- Schwingungsdauer T (Periode)
- Frequenz f:

  Quotient aus der Anzahl der Schwingungen n und der dafür benötigten Zeit t

  $f = \frac{n}{t};$

  Speziell für $n = 1$; $\Rightarrow f = \frac{1}{T};$

  Einheit: $1\mathrm{s}^{-1} = 1\mathrm{Hz}$ (HEINZ, err, HERTZ)

- Momentane Auslenkung oder Elongation $y(t)$:
  Zeitabhängig, Abstand des Körpers von der Ruhelage
  Am Gleichgewichtspunkt ist $y = 0$;
- Amplitude A: Maximale Elongation ($A > 0$)
- Die **Rückstellkraft** F ist diejenige Kraft, die auf den ausgelenkten Körper in Richtung der Ruhelage wirkt.

Gleichförmige Kreisbewegung und harmonische Schwingung

Es gilt:

$$\left.\begin{array}{rcl} y(t) & = & A \cdot \varphi; \\ \varphi & = & \omega t; \end{array}\right\} \Rightarrow y(t) = A \cdot \sin \omega t; \Rightarrow y(t) = A \cdot \sin(2\pi \tfrac{t}{T});$$

Die Schattenprojektor der Kreisbewegung führt eine **Sinusschwingung** aus. Man nennt periodische Sinusschwingungen auch **harmonische Schwingungen**.

Eigenschaften harmonischer Schwingungen

- Weg-Zeit-Funktion: $y(t) = A \cdot \sin \omega t;$
- Geschwindigkeit-Zeit-Funktion: $v(t) = \dot{y}(t) = A\omega \cdot \cos \omega t;$
- Beschleunigung-Zeit-Funktion: $a(t) = \dot{v}(t) = \ddot{y}(t) = -A\omega^2 \cdot \sin \omega t;$
  Folgerung: $\ddot{y}(t) = -\omega^2 \cdot y(t);$
  $a(t) = -\omega^2 \cdot y(t); \Rightarrow a(t) \sim y(t)$! (Direkte Proportionalität)

Bei harmonischen Schwingungen ist die Beschleunigung proportional zur Auslenkung.

$a(t) = -\omega^2 \cdot y(t);$

Nach Newton ($F = ma$)

$F(t) = ma(t) = -m\omega^2 \cdot y(t);$ (Rückstellkraft)

Federgesetz (Hooksches Gesetz): $F = -Dy$

$\Rightarrow$ Für Federn gilt: $D = m\omega^2;$

$\omega = \frac{2\pi}{T}; \Rightarrow D = m\frac{4\pi^2}{T^2}; \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}};$ (Schwingungsdauer der Federschwingung)

Harmonische Schwingungen erkennt man an einem linearen Kraftgesetz, die Rückstellkraft ist proportional zur Auslenkung.

[Überprüfung der Formel im Experiment (stimmt T der „Wirklichkeit“ mit dem berechneten Wert überein?)]

[Antwort: Ja, natürlich. »;)«]

Das Fadenpendel

Auslenkung: Bogenstück y

$y = \alpha l;$

$F_\mathrm{R} = F_\mathrm{G} \cdot \sin\alpha = mg \cdot \sin\alpha;$ (Rückstellkraft)

$\sin\alpha = \frac{F_\mathrm{R}}{\mathrm{G}}; \Rightarrow F_\mathrm{R} = mg \cdot \sin\frac{y}{l};$ (Kein lineares Kraftgesetz!)

Aber: Für kleine Auslenkwinkel α gilt $\sin\alpha \approx \alpha$.

$\Rightarrow$ Für kleine α gilt näherungsweise:

$F_\mathrm{R} = mg\frac{y}{l};$ (Lineares Kraftgesetz)

(Spiralfeder: $F_\mathrm{R} = Dy;$)

$F_\mathrm{R} = kg$ mit $k = \frac{mg}{l}$ mit $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}};$

$\Rightarrow$ Schwingungsdauer $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}} = 2\pi\sqrt{\frac{ml}{mg}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}};$

1.1.16 Wellenlehre

Grundbegriffe der Wellenlehre

[Graphik]

- Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle: $c = \frac{\Delta x}{\Delta t};$
- [Noch bessere, ausgeteilte Grafik]
  $y(t)$: Auslenkung des Massenpunktes (zur Zeit t)
- x: Ort (Ruhelage) des Massenpunktes
- $f = \frac{1}{T}$: Frequenz der Schwingung des Massenpunktes
- $c = \frac{\lambda}{T}$: Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle
  $c = \lambda \cdot f$ (Grundgleichung der Wellenausbreitung!)
  (c heißt auch **Phasengeschwindigkeit**.)

Beschreibung der fortschreitenden Welle

Annahme: Der Erreger am Anfang führt eine Sinusschwingung aus.

Erreger: $y(t) = A \sin \omega t;$

Nach der Zeit t_1 erreicht die Störung die Stelle x_1.

Dabei gilt: $c = \frac{\lambda}{T} = \frac{x_1}{t_1}; \Rightarrow t_1 = \frac{x_1}{c} = \frac{Tx_1}{\lambda};$

$\Rightarrow$ Ein Masseteilchen im Abstand x_1 vom Erreger schwingt somit mit $y(x_1, t) = A \sin \omega (t - t_1) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{Tx_1}{\lambda} \right);$

$\Rightarrow$ Wellengleichung: $y(x,t) = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{T}{\lambda} x \right) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right);$

(T: Zeitliche Periode, λ: räumliche Periode)